



Semnan University

# Applied Chemistry Today

Journal homepage: <https://chemistry.semnan.ac.ir/>

ISSN: 2981-2437



Research Article

## A Comparative Study on the Water Quality of Khairabad and Maroon Rivers and the Role of Membrane Filtration in Their Treatment

Mohammad Jandkaripour<sup>a</sup>, Mahdi Elyasi Kojabad<sup>a,\*</sup>, Raheleh Haghighi<sup>b, c</sup>

<sup>a</sup> Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran

<sup>b</sup> Department of Environmental Engineering, Islamic Azad University, Ahvaz Branch, Ahvaz, Iran

<sup>c</sup> Khuzestan Water and Wastewater Company, Drinking Water Treatment Plant – Quality and Process Control Unit, Behbahan, Iran

### PAPER INFO

#### Article history:

Received: 12/Dec/2025

Revised: 22/Feb/2026

Accepted: 29/Apr/2026

#### Keywords:

Maroon River,  
Khairabad River,  
Ceramic Membrane,  
Drinking Water,  
Removal of Microbial  
Pollutants.

### ABSTRACT

This study presents a rigorous evaluation of the efficacy of membrane filtration as an advanced technology for producing drinking water from two distinct water sources. The investigation began with a comprehensive comparative analysis of the physicochemical and biological parameters of raw water from the Khairabad and Maroon rivers. This baseline assessment revealed a significant disparity in mineral content, with the Maroon River exhibiting a substantially higher Total Dissolved Solids (TDS) concentration of 1393 mg/L compared to the Khairabad River's 739 mg/L. Subsequently, the performance of the membrane filtration process was assessed for both water types. The results demonstrated the notable consistency of this technology. The system effectively reduced turbidity to below 0.7 NTU and consistently maintained a Silt Density Index (SDI) below 0.03, indicating superior particulate removal and low fouling potential. A key advantage observed was the membrane's selective removal capability, which successfully eliminated undesirable particulates and microbial load while preserving the fundamental chemical composition and beneficial minerals of the water. A comparative evaluation of membrane cleaning mechanisms further revealed that backwashing was significantly more effective than air scouring. The backwashing protocol achieved a remarkable recovery of over 94% of the initial membrane flux, underscoring its superiority in maintaining long-term operational efficiency. Microbiologically, membrane filtration was successful in removing a major portion of the microbial load. Utilizing this method as a complementary pre-treatment stage prior to chlorination can be an optimal strategy that removes the bulk of contaminants, subsequently requiring only a low dose of disinfectant to provide a residual protective effect throughout the distribution network.

DOI: <https://doi.org/10.22075/chem.2026.40030.2416>

© 2026 Semnan University.

This is an open access article under the CC-BY-SA 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>)

\*.Corresponding author: Assistant Professor, Department of Chemical Engineering. E-mail address: [m.elyasi@bkatu.ac.ir](mailto:m.elyasi@bkatu.ac.ir)

**How to cite this article:** Jandkaripour, M., Elyasi Kojabad, M. & Haghighi, R. (2026). A Comparative Study on the Water Quality of Khairabad and Maroon Rivers and the Role of Membrane Filtration in Their Treatment. *Applied Chemistry Today*, 21(78), 91-110. (in Persian)

## بررسی تطبیقی کیفیت آب حاصل از رودخانه‌های خیرآباد و مارون و نقش فیلتراسیون

### غشایی در تصفیه آن‌ها

محمد جندکاری پور<sup>۱</sup>، مهدی الیاسی کجاباد<sup>۲\*</sup>، راحله حقیقی<sup>۲،۳</sup>

<sup>۱</sup> گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان، بهبهان، ایران

<sup>۲</sup> گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اهواز، اهواز، ایران

<sup>۳</sup> شرکت آب و فاضلاب استان خوزستان، تصفیه‌خانه آب شرب شهرستان بهبهان – واحد کنترل کیفیت و فرآیند، بهبهان، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۹/۲۱	این مطالعه، بررسی دقیقی از کارایی فیلتراسیون غشایی به عنوان یک فناوری پیشرفته برای تولید آب آشامیدنی از دو منبع متفاوت ارائه می‌دهد. مطالعه با یک تحلیل جامع از پارامترهای فیزیکوشیمیایی و بیولوژیکی آب رودخانه‌های خیرآباد و مارون صورت گرفت. بر این اساس، رودخانه مارون با غلظت مواد جامد محلول (TDS) ۱۳۹۳ میلی‌گرم در لیتر، به طور قابل توجهی غنی‌تر از رودخانه خیرآباد (۷۳۹ میلی‌گرم در لیتر) بود. علاوه بر این، عملکرد فیلتراسیون غشایی روی هر دو نوع آب مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج، ثبات قابل توجه این فناوری را نشان داد. این سیستم به طور مؤثر کدورت را به کمتر از ۰/۷ NTU کاهش داد و همچنین شاخص چگالی سیلت (SDI) را به طور مداوم زیر ۰/۰۳ حفظ کرد. یکی از مزیت‌های مهم، قابلیت حذف انتخابی غشا بود، به طوری که موفق به حذف بخش اعظمی از ذرات و بار میکروبی نامطلوب شد، در حالی که ترکیب شیمیایی اصلی آب و مواد معدنی مفید آن را حفظ نمود. ارزیابی مقایسه‌ای از مکانیسم‌های تمیز کردن غشا نشان داد که شستشوی معکوس به طور قابل توجهی مؤثرتر از هوادهی است. شستشوی معکوس بازیابی چشمگیر بیش از ۹۴ درصد از شار اولیه غشا را به دست آورد که بر برتری آن در حفظ کارایی بلندمدت تأکید داشت. از منظر میکروبیولوژیکی فیلتراسیون غشایی در حذف بخش اعظمی از بار میکروبی موفق بوده و استفاده از این روش به عنوان مرحله مکمل کلر زنی، بخش عمده آلودگی را حذف کرده و سپس از یک ضدعفونی‌کننده سبک برای ایجاد اثر محافظتی در شبکه توزیع می‌توان استفاده کرد.
بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۱۲/۰۳	
پذیرش مقاله: ۱۴۰۵/۰۲/۰۹	
<b>کلمات کلیدی:</b> رودخانه مارون، رودخانه خیرآباد، غشای سرامیکی، آب آشامیدنی، حذف آلاینده‌های میکروبی.	

DOI: <https://doi.org/10.22075/chem.2026.40030.2416>

This is an open access article under the CC-BY-SA 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>)

#### ۱- مقدمه

آب پایه‌ای‌ترین نیاز بشر و محور توسعه پایدار در هر منطقه‌ای محسوب می‌شود. در جهان امروز، دسترسی به منابع آب آشامیدنی سالم و مطمئن نه تنها یک اولویت بهداشتی، بلکه یک شاخص کلیدی در سنجش پیشرفت و رفاه جامعه است [۱]. با این حال، رشد سریع جمعیت، گسترش فعالیت‌های صنعتی و کشاورزی و پیامدهای اجتناب‌ناپذیر تغییرات اقلیمی، فشار بی‌سابقه‌ای را بر منابع آب شیرین وارد کرده و کیفیت آن را در معرض تهدیداتی جدی قرار داده است [۲]. این چالش در مناطق نیمه‌خشک و خشک جهان، از جمله ایران، به مراتب حادتر و حیاتی‌تر است، به طوری که منابع آب، همزمان باید پاسخ‌گوی نیازهای شرب، صنعت و کشاورزی باشند [۳].

شهرستان بهبهان در استان خوزستان نیز از این قاعده مستثنی نیست. این منطقه به طور تاریخی برای تأمین آب مورد نیاز خود، به ویژه در بخش شرب، به دو شریان اصلی حیات‌بخش خود، یعنی رودخانه‌های خیرآباد و مارون متکی بوده است. رودخانه مارون به عنوان یکی از رودهای مهم حوضه آبریز خلیج فارس، و رودخانه خیرآباد به عنوان یکی از منابع مهم محلی، نقش تعیین‌کننده‌ای در پایداری زیست محیطی و اقتصادی این منطقه ایفا می‌کنند. از این رو انجام یک مطالعه تطبیقی دقیق و علمی برای سنجش میزان آلاینده‌ها و تعیین دقیق‌ترین شاخص‌های کیفی آب این دو منبع یک ضرورت اجتناب‌ناپذیر است. در این راستا به کارگیری فناوری‌های تصفیه‌ای نوین و کارآمد، تنها راهکار ممکن برای تضمین استانداردهای آب آشامیدنی است [۴].

هوانگ<sup>۱</sup> و همکاران [۵] فناوری ترکیبی فوتوالکتروشیمیایی-جوشاندن را برای حذف محصولات جانبی ضدعفونی از آب آشامیدنی ارائه کردند. در حالی که جوشاندن سنتی تنها قادر به حذف کمتر از ۱۰ درصد از برخی از محصولات جانبی بود، این فناوری با ترکیب فرآیندهای فوتوالکتروشیمیایی و حرارتی به راندمان حذف بالای ۷۰ درصد دست یافت. بر اساس مطالعه‌ای در زمینه فناوری غشا، تیوپ<sup>۲</sup> و همکاران [۶] به بررسی غشاهای ساخته شده از پلی‌سولفون با افزودنی‌های طبیعی پرداختند. نتایج نشان داد که غشاهای حاوی ۰/۱۵ درصد پودر برگ موز بالاترین کارایی را از نظر نفوذپذیری آب، تخلخل، مقاومت در برابر گرفتگی و استحکام مکانیکی دارند. اندازه منافذ این غشاها کوچکتر از باکتری‌های رایجی مانند اشرشیاکلی بوده و برای شرایط محیطی با فشار و دمای بالا مناسب هستند. شن<sup>۳</sup> و همکاران [۷] یک فناوری نوین کربن فعال دانه‌ای-نانو ازن را معرفی کردند. این روش موجب افزایش ۶ درصدی ظرفیت جذب کربن و حذف بیش از ۷۶ درصد آلاینده‌های آلی شد. در حالی که مطالعات پیشین به بررسی کارایی فناوری‌های مختلف پرداخته‌اند. در میان فناوری‌ها مختلف، فرآیندهای فیلتراسیون غشایی به دلیل دارا بودن مزایای منحصر به فردی همچون راندمان حذف بسیار بالا، نیاز کم به فضای فیزیکی، امکان حذف طیف وسیعی از آلاینده‌ها اعم از عوامل ایجادکننده کدورت، ذرات کلوئیدی، باکتری‌ها، ویروس‌ها و حتی یون‌های معدنی و آلی، و همچنین قابلیت کنترل پیوسته، به عنوان یک تحول انقلابی در صنعت تصفیه آب شناخته می‌شوند [۶]. غشاهای مورد استفاده در این فناوری، معمولاً از جنس سرامیک یا پلیمرهای پیشرفته بوده و با دارا بودن ساختار متخلخل مهندسی‌شده در ابعاد نانو و میکرو، قادر به ایجاد سد فیزیکی انتخابی بسیار مؤثری در برابر ناخالصی‌ها هستند [۸]. این غشاها با مکانیسم غربالی و بر اساس اندازه ذرات، عمل جداسازی را انجام می‌دهند. مکانیسم جداسازی در این سیستم‌ها مبتنی بر اعمال اختلاف فشار به عنوان نیروی محرکه است که باعث ایجاد جریان تراوشی از محیط غلیظ به محیط رقیق می‌شود. در این فرآیند، آب از میان منافذ ریز غشا عبور کرده در حالی که آلاینده‌ها بر اساس اندازه در پشت غشا باقی می‌مانند [۹]. در این میان، غشاهای سرامیکی مورد استفاده در این سیستم‌ها از مزایای قابل توجهی همچون مقاومت مکانیکی و شیمیایی بالا، عمر طولانی، قابلیت تحمل درجه حرارت‌های بالا و

<sup>1</sup> Huang

<sup>2</sup> Tupe

<sup>3</sup> Shen

امکان شستشوی شیمیایی قوی برخوردار هستند [۱۰]. این ویژگی‌ها باعث می‌شود سیستم‌های غشایی قابلیت کارکرد در شرایط سخت عملیاتی را داشته و بتوانند در تصفیه پساب‌های صنعتی با کیفیت متغیر نیز به خوبی عمل نمایند. همچنین امکان بازیابی و استفاده مجدد از پساب تصفیه‌شده در چرخه تولید، این فناوری را به یکی از پایدارترین روش‌های تصفیه آب در جهان تبدیل کرده است [۱۱]. تحقیقات گسترده‌ای در راستای استفاده از روش فیلتراسیون غشایی به منظور تصفیه آب و پساب صورت گرفته است. چن<sup>۱</sup> و همکاران [۱۲] در پژوهشی نوآورانه، کارایی روش تلفیقی ازن‌زنی و فیلتراسیون غشایی را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه، ترکیب پیش‌اکسیداسیون با ازن به همراه فرآیند غشایی، منجر به بهبود قابل توجهی در حذف آلاینده‌های مقاوم و ترکیبات آلی با وزن مولکولی پایین گردید. نتایج این تحقیق نشان داد که این رویکرد تلفیقی نه تنها راندمان کلی تصفیه را افزایش می‌دهد، بلکه با کاهش پدیده گرفتگی غشا، طول عمر عملیاتی سیستم را نیز به طور معناداری بهبود می‌بخشد. در مطالعه‌ای دیگر، اقدمی و الیاسی [۱۳] به بررسی کاربرد فیلتراسیون غشایی در تصفیه فاضلاب شهری پرداختند. سیستم طراحی‌شده در این پژوهش موفق شد تا کدورت پساب را به میزان قابل‌ملاحظه‌ای کاهش داده و به مقادیر کمتر از ۱ NTU برساند. این کیفیت مطلوب، امکان استفاده مجدد از پساب تصفیه‌شده را در مصارف صنعتی و آبیاری فضای سبز به طور کامل فراهم نمود. علاوه بر این، پژوهش مذکور نشان داد که فیلتراسیون غشایی قادر است به طور همزمان شاخص‌های میکروبیولوژیکی را نیز به طور کامل حذف نماید، که این امر گامی مهم در جهت تضمین سلامت آب بازیافتی محسوب می‌شود. اصطبار و همکاران [۱۴] با به‌کارگیری یک سیستم پیش‌تصفیه چندمرحله‌ای شامل هوادهی، انعقاد شیمیایی و فیلتراسیون غشای سرامیکی موفق به کاهش شاخص چگالی سیلت<sup>۲</sup> (SDI)، کدورت و BOD شدند که شرایط بهینه‌ای برای ورودی سیستم اسمز معکوس فراهم آورد.

بر این اساس، در این پژوهش با توجه به اهمیت سالم بودن منابع آبی موجود، نخست یک ارزیابی تطبیقی جامع از کیفیت فیزیکوشیمیایی و بیولوژیکی آب رودخانه‌های خیرآباد و مارون صورت گرفته تا تصویری شفاف از وضعیت موجود این دو منبع استراتژیک ارائه شود. در ادامه به بررسی کارایی و اثربخشی فرایند میکروفیلتراسیون غشایی نانو ساختار در ارتقای کیفیت آب هر دو منبع و حذف آلاینده‌های شاخص پرداخته شده است. تمایز اصلی این پژوهش در انجام یک مطالعه تطبیقی مستقل و موازی بر روی هر دو منبع به عنوان منبع اصلی آب آشامیدنی شهرستان بهبهان با ویژگی‌های خاص و متفاوت فیزیکوشیمیایی است. این پژوهش در پی آن است تا با ارائه داده‌های علمی مستدل، راهکارهای عملیاتی برای بهبود هر چه بیشتر آب آشامیدنی خروجی از تصفیه خانه مرکزی بهبهان پیشنهاد دهد و گامی مؤثر در جهت تضمین سلامت آب شرب، بهبود رفاه اجتماعی و حرکت به سمت توسعه پایدار در منطقه بردارد. در این پژوهش، به‌طور خاص پدیده گرفتگی غشا در مواجهه با دو نوع آب با

<sup>1</sup> Chen

<sup>2</sup> Silt Density Index

ماهیت متفاوت بررسی شده و برای نخستین بار عملکرد دو مکانیسم پاک‌سازی غشا (هوادهی و شستشوی معکوس) به صورت کمی و مقایسه‌ای ارزیابی شد. بررسی ارتباط بین ویژگی‌های شیمیایی آب و عملکرد غشا با رویکردی تحلیلی و با استفاده از داده‌های درصدی یون‌ها نیز از دیگر اهداف این پژوهش است که در مطالعات پیشین کمتر مورد توجه بوده است.

## ۲- بخش تجربی

### ۲-۱- مواد

در این تحقیق، برای تهیه غشاهای سرامیکی از مواد شیمیایی شامل پودر آلومینا (تهیه‌شده از شرکت نسوز خوزستان با خلوص ۹۶ درصد)، سدیم هیدروکسید (تهیه‌شده از شرکت کلر پارس با خلوص ۹۸ درصد) و نیز آکریل آمید، پتاسیم متابیسولفیت و دی آمونیوم فسفات (با خلوص ۹۹ درصد از شرکت مرک) استفاده شد. آب آشامیدنی مورد بررسی نیز، از خروجی تصفیه خانه‌های مربوط به دو رودخانه مارون و خیرآباد تهیه شد. در راستای تسهیل گزارش نتایج حاصل از ارزیابی‌های مختلف آب آشامیدنی حاصل از رودخانه مارون به عنوان نمونه ۱ و آب آشامیدنی حاصل از رودخانه خیرآباد به عنوان نمونه ۲ نام گذاری شد. جدول ۱ خواص مربوط به این دو نمونه آب را نشان می‌دهد.

جدول ۱. مشخصات نمونه‌های آب تهیه شده از دو رودخانه مارون (نمونه ۱) و خیرآباد (نمونه ۲)

پارامتر	نمونه ۱	نمونه ۲
F (mg/L)	۰/۷	۰/۵
Cl (mg/L)	۲۱۷	۱۴۲
SO <sub>4</sub> (mg/L)	۵۰۰	۳۸۴
HCO <sub>3</sub> (mg/L)	۱۷۰/۸	۱۷۰/۸
NO <sub>3</sub> (mg/L)	۳/۵۲	۶/۶
NO <sub>2</sub> (mg/L)	۰/۰۲	۰
Ca (mg/L)	۱۷۶/۲	۱۴۴
Mg (mg/L)	۵۴/۴	۱۹/۴
Na (mg/L)	۲۹۹	۹۲
Fe (mg/L)	۰/۰۱	۰
TDS (mg/L)	۱۳۹۳	۷۳۹
کدورت (NTU)	۱/۷۲	۱/۳۹

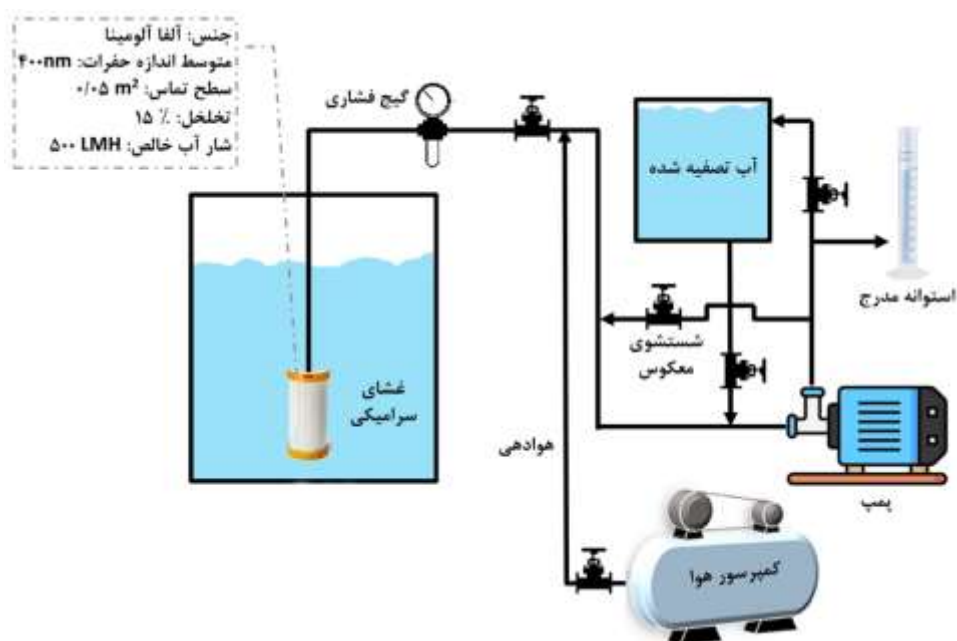
### ۲-۲- تهیه غشای سرامیکی

برای ساخت غشای سرامیکی، ابتدا مقدار مشخصی آب مقطر در یک ظرف ریخته شد. سپس آکریل آمید به آن افزوده گردید تا کاملاً در حلال حل شود. در مرحله بعد، pH محلول با استفاده از محلول سدیم هیدروکسید بر روی ۹ تنظیم شد. پس از تنظیم pH، پتاسیم متابیسولفیت و به دنبال آن، پودر آلومینا به تدریج به مخلوط اضافه شدند. مخلوط ناهمگن حاصل به مدت ۴۸ ساعت تحت همزدن مکانیکی قرار گرفت. پس از این مدت، دمای مخلوط به ۵۰ درجه سانتیگراد افزایش داده شد و دی‌آمونیم فسفات به عنوان آغازگر واکنش پلیمریزاسیون افزوده گردید. ۵ دقیقه پس از افزودن آغازگر، عمل قالب‌ریزی و شکل‌دهی غشا

انجام پذیرفت. در نهایت، غشای شکل‌دهی شده تحت عملیات حرارتی در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد قرار گرفت تا فرآیند تفجوشی تکمیل شود [۱۵]. مورفولوژی غشاهای تهیه شده با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) با مدل TESCAN BRNO-Mira3 LMU مورد بررسی قرار گرفت. توزیع اندازه حفرات نیز با استفاده از نرم‌افزار ImageJ از تصاویر FESEM محاسبه شده و بدست آمد [۱۶].

### ۳-۲- فرایند تصفیه

شماتیک فیلتراسیون غشایی در شکل ۱ ارائه شده است. مراحل اصلی این فرآیند به این ترتیب انجام گرفت که ابتدا، آب آشامیدنی خروجی از تصفیه‌خانه در یک مخزن ذخیره جمع‌آوری شده و سپس، تصفیه با استفاده از غشای سرامیکی انجام پذیرفت. سازوکار جداسازی در این غشا بر اساس فیلتراسیون فشاری است. به عبارتی، محرک اصلی این فرآیند، اختلاف فشار ایجادشده توسط پمپ در دو سوی غشا است. فشار ۰/۵ اتمسفر به عنوان فشار بهینه بر اساس آزمایش‌های اولیه و با هدف دستیابی به شار عبوری مناسب و در عین حال کاهش مصرف انرژی و جلوگیری از فشردگی و تخریب ساختار غشا انتخاب شده است. تمامی آزمایش‌ها در دمای محیط انجام پذیرفت تا شرایط واقعی بهره‌برداری شبیه‌سازی شود. به دلیل ساختار متخلخل غشا، ذرات معلق، کلوئیدها و آلاینده‌های میکروبی با اندازه بزرگ‌تر از منافذ، در سطح آن به دام افتاده و جریان باقی مانده را تشکیل می‌دهند. در مقابل، آب تصفیه‌شده از داخل منافذ ریز غشا عبور کرده و جمع‌آوری می‌شود. عامل محرک اصلی این فرآیند، اختلاف فشار (۰/۵ اتمسفر) ایجادشده توسط پمپ در دمای محیط است. از آنجایی که این روش به صورت پیوسته انجام می‌گرفت و آب ریخته شده به مخزن خوراک به صورت پیوسته از غشا عبور داده می‌شد حجم نمونه مورد بررسی در هر آزمایش با دو بار تکرار اندازه‌گیری شد.



شکل ۱. شماتیک فیلتراسیون غشایی استفاده شده به منظور تصفیه آب آشامیدنی

به منظور بازیابی و حفظ کارایی میکروفیلتراسیون، از دو نوع سیستم هوادهی<sup>۱</sup> و شستشوی معکوس<sup>۲</sup> استفاده شد. به عبارتی، این سیستم‌ها بعد از کاهش شار عبوری ناشی از گرفتگی غشا، فعال شده و توانمندی هر دو نوع سیستم در حذف ذرات انباشته‌شده روی سطح غشا و بازیابی شار عبوری غشا مورد بررسی قرار گرفت. شار جریان خروجی از غشا برحسب لیتر بر متر مربع ساعت (LMH) با استفاده از رابطه ۱ بدست می‌آید [۱۷].

$$J = \frac{Q}{A} \quad (1)$$

که در آن Q دبی حجمی جریان عبور کرده برحسب لیتر بر ساعت و A مربوط به سطح مقطع غشایی برحسب m<sup>2</sup> می‌باشد. به منظور کمی‌سازی دقیق پدیده گرفتگی و تعیین سهم هر یک از مکانیسم‌های گرفتگی در افت عملکرد غشا، مقاومت‌های هیدرولیکی مختلف با استفاده از مدل مقاومت‌های سری محاسبه گردید. بر این اساس، مقاومت هیدرولیکی کل (R<sub>t</sub>) در فرآیند فیلتراسیون از رابطه زیر تبعیت می‌کند.

$$J = \frac{\Delta P}{\mu \cdot R_t} \quad (2)$$

که در این رابطه،  $\Delta P$  اختلاف فشار عرضه‌شده (Pa)،  $\mu$  ویسکوزیته دینامیکی آب (Pa.s) و R<sub>t</sub> مقاومت هیدرولیکی کل (m<sup>-1</sup>) می‌باشد. مقاومت کل از مجموع مقاومت ذاتی غشا (R<sub>m</sub>)، مقاومت ناشی از گرفتگی برگشت‌پذیر (R<sub>rev</sub>) و مقاومت ناشی از گرفتگی برگشت‌ناپذیر (R<sub>irr</sub>) تشکیل شده است.

$$R_t = R_m + R_{rev} + R_{irr} \quad (3)$$

## ۴-۲- کیفیت سنجی

برای ارزیابی دقیق کیفیت نمونه‌ها و سنجش کارایی فرآیند تصفیه، آنالیزهای فیزیکوشیمیایی گسترده‌ای بر روی نمونه‌های خام، پیش تصفیه‌شده و تصفیه‌شده نهایی انجام گرفت. این آنالیزها بر اساس پروتکل‌های استاندارد و با استفاده از دستگاه‌های دقیق آزمایشگاهی صورت پذیرفت. برای سنجش میزان مواد معلق و کدورت، که از پارامترهای کلیدی در ارزیابی کارایی انعقاد و میکروفیلتراسیون به شمار می‌روند، از دستگاه کدورت سنج (AQUA LYTIC AL450T-IR) استفاده شد که بر اساس روش نفلومتری، میزان پراکندگی نور توسط ذرات موجود در آب را محاسبه می‌کند. همچنین، برای تعیین دقیق غلظت آنیون‌ها و کاتیون‌های مهم موجود در نمونه‌ها، غلظت آنیون‌ها و کاتیون‌های اصلی با استفاده از اسپکتروسکوپی UV-Vis ساخت شرکت پویش تدبیر کرانه (PT-100) مطابق با پروتکل‌های استاندارد مبتنی بر معرف اندازه‌گیری شد. علاوه بر این، برای اطمینان از

<sup>1</sup> Air Scouring

<sup>2</sup> Backwashing

صحت و دقت تمامی اندازه‌گیری‌ها، کلیه دستگاه‌ها پیش از استفاده به دقت کالیبره شدند و برای هر سری از آنالیزها، از نمونه‌های استاندارد و بلانک به عنوان مرجع استفاده گردید تا خطاهای سیستماتیک به حداقل برسد و صحت داده‌ها تضمین شود. برای ارزیابی بار میکروبی نمونه‌ها و تعیین کارایی فرآیند تصفیه در حذف آلاینده‌های بیولوژیکی، از روش‌های استاندارد میکروبیولوژی آب استفاده شد. شاخص‌های آلودگی مدفوعی (کلیفرم کل و اشرشیاکلی) با استفاده از روش تخمیر چند لوله‌ای در محیط کشت لاکتوز براث ارزیابی شد. پس از انکوباسیون، تعداد لوله‌های مثبت در سری‌های رقت مختلف ثبت و محتمل‌ترین عدد<sup>۱</sup> (MPN) با مراجعه به جدول استاندارد تعیین گردید. نتایج نهایی به صورت MPN در ۱۰۰ میلی‌لیتر (MPN/100mL) گزارش شد.

## ۲-۵- اندازه‌گیری SDI

به منظور اندازه‌گیری SDI ابتدا فیلتر مربوطه در مدول مخصوص قرار داده شده و به سیستم پمپ و لوله‌کشی وصل شد. در ادامه پمپ فشار ثابت روی فشار ۲ اتمسفر تنظیم شده و مانومتر نیز برای نظارت روی فشار ورودی به فیلتر وصل شد. با باز کردن شیر آب ورودی و هدایت آن به فیلتر، آب به صورت یکنواخت و پیوسته جریان پیدا کرد. با جریان یافتن آب بازه‌ی زمانی جمع شدن ۵۰۰ میلی‌لیتر آب اندازه‌گیری شد ( $T_i$ ). بعد از گذشت زمانهای مختلف، مدت زمانی که دوباره ۵۰۰ میلی‌لیتر آب جمع می‌شود اندازه‌گیری شده و به عنوان زمان ثانویه ( $T_f$ ) ثبت شد. شاخص SDI با استفاده از رابطه ۲ بدست آمد که در آن  $T$  کل زمان گذشته از شروع فرایند می‌باشد.

$$SDI = \frac{1 - \frac{T_i}{T_f}}{T} \times 100 \quad (2)$$

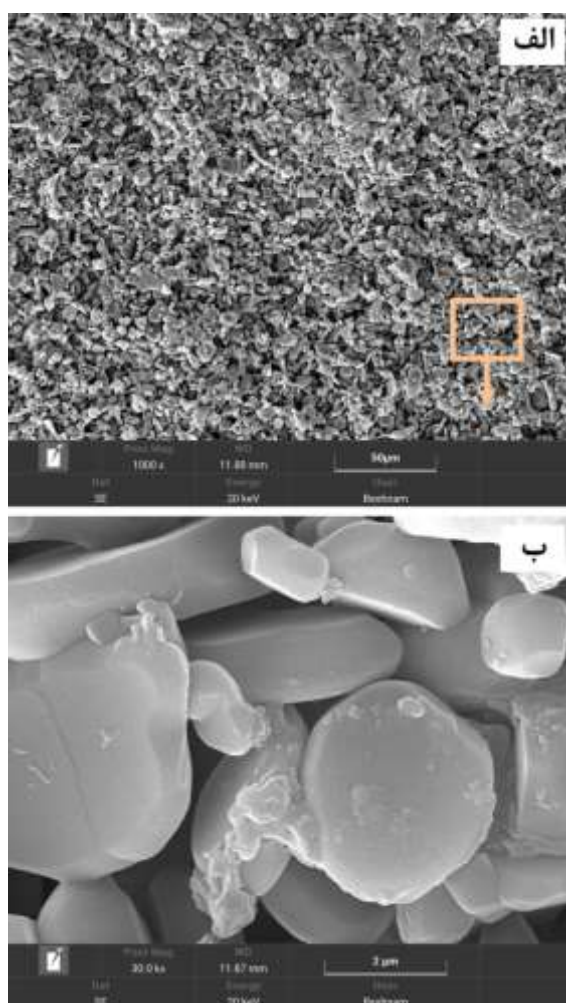
## ۳- بحث و نتیجه‌گیری

### ۳-۱- مشخصه‌یابی غشا

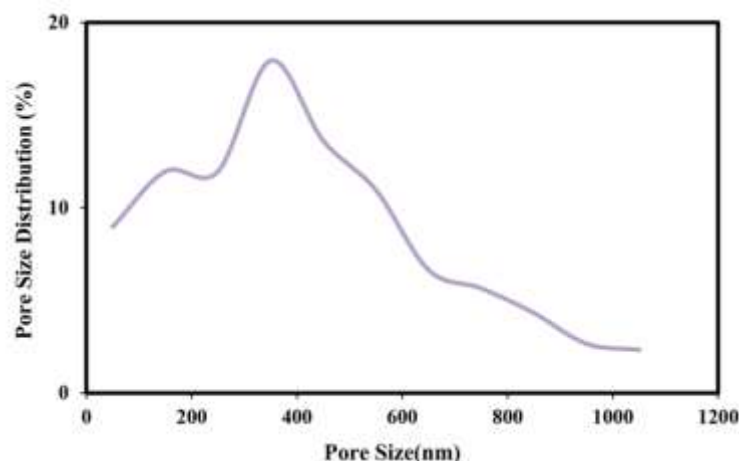
به منظور بررسی موفولوژی سطح و تعیین توزیع اندازه حفره‌های غشای سرامیکی ساخته شده، از آنالیز FESEM استفاده شد. تصاویر به دست آمده در دو بزرگنمایی مختلف، اطلاعات ارزشمندی را از ریزساختار غشا فراهم می‌نمایند (شکل ۲). مشاهدات در بزرگنمایی پایین تصویری از یکنواختی سطح، توزیع یکنواخت ذرات و عدم وجود ترک‌ها یا عیوب ماکروسکوپی را به خوبی نشان می‌دهد. این تصویر تأیید می‌کند که فرآیند ساخت (شامل اختلاط، قالب‌گیری و سینترینگ) به درستی انجام شده و به یک ساختار یکپارچه و بدون ناپیوستگی منجر گردیده است [۱۸]. در بزرگنمایی بالاتر، جزئیات دقیق‌تری از نحوه آرایش و اتصال ذرات آشکار می‌گردد. همانطور که در شکل ۲ مشهود است، ذرات اولیه آلومینا که دارای اشکال چندضلعی و اندازه‌های نسبتاً یکنواخت هستند، به صورت کاملاً فشرده در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند و یک شبکه متخلخل سه‌بعدی را تشکیل داده‌اند.

<sup>1</sup> Most Probable Number

فازهای متراکم‌شده و نقاط تماس بین ذرات که حاصل فرآیند سینترینگ موفقیت‌آمیز است، به وضوح قابل تشخیص است. توزیع اندازه حفرات غشایی که از تصویر FESEM بدست آمده است نیز در شکل ۳ آورده شده است. این نمودار، اطلاعات ارزشمندی را در خصوص ریزساختار و یکنواختی غشا ارائه می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، توزیع اندازه حفرات از یک الگوی تقریباً نرمال با یک قله مشخص پیروی می‌کند که نشان‌دهنده همگنی مناسب ساختار غشا است. محدوده اندازه حفرات از حدود ۱۰۰ نانومتر تا ۱۱۰۰ نانومتر متغیر بوده و بیشترین فراوانی (حدود ۳۵ درصد) در محدوده ۳۵۰ تا ۴۵۰ نانومتر متمرکز شده است. میانگین اندازه حفرات با تقریب خوبی در حدود ۴۰۰ نانومتر قرار دارد که با هدف طراحی اولیه برای دستیابی به یک غشای میکروفیلتراسیون کارآمد همخوانی کامل دارد. این ساختار یکنواخت که حاصل بهینه‌سازی شرایط ساخت است، نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد جداسازی غشا و دستیابی به شار اولیه داشته است. علاوه بر این، واضح است که حفرات با اندازه بزرگ‌تر (بالای ۸۰۰ نانومتر) سهم ناچیزی در ساختار کلی دارند که نشان‌دهنده کیفیت بالای فرآیند ساخت و عدم ایجاد عیوب ساختاری است [۱۹].



شکل ۲. تصویر FESEM از سطح غشای سرامیکی با دو بزرگنمایی مختلف



شکل ۳. توزیع اندازه حفرات غشای میکروفیلتر

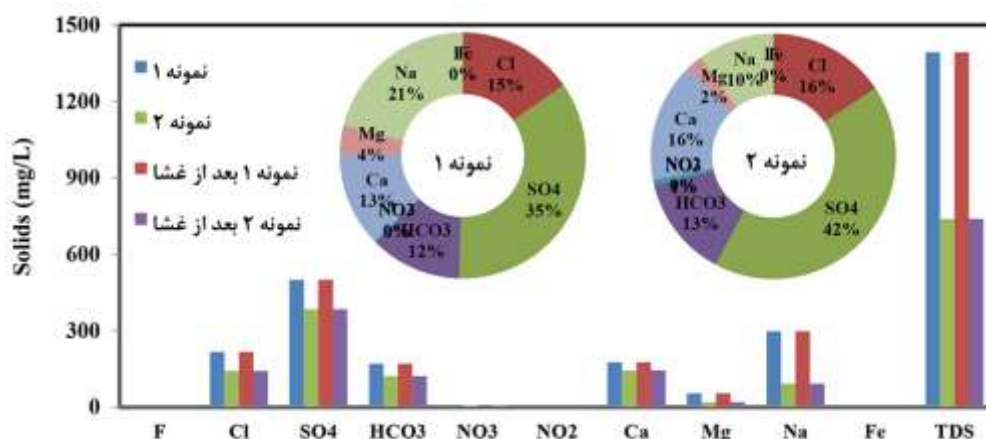
### ۳-۲- املاح محلول در آب

شکل ۴ املاح موجود در آب حاصل از دو رودخانه مارون و خیرآباد را نشان می‌دهد. با نگاهی به داده‌های ارائه شده، دو رودخانه کاملاً متمایز را مشاهده می‌کنیم. رودخانه مارون با کل مواد جامد محلول<sup>۱</sup> (TDS) ۱۳۹۳ میلی‌گرم در لیتر، مشخصات یک آب سنگین و غنی از املاح را نشان می‌دهد. این عدد بالا حاکی از آن است که آب در مسیر خود با سازندهای زمین‌شناسی غنی از نمک و املاح در تماس بوده است. غلظت بالای سولفات (۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر) و کلر (۲۱۷ میلی‌گرم در لیتر) این موضوع را تأیید می‌کند. از سوی دیگر، سختی آب نیز به دلیل وجود کلسیم (۱۷۶ میلی‌گرم در لیتر) و منیزیم (۵۴ میلی‌گرم در لیتر) قابل توجه است. اگرچه این آب از نظر میکروبی ممکن است قابل قبول باشد، اما طعم و کیفیت آن برای شرب ممکن است مطلوب نباشد و حتی می‌تواند در مصارف صنعتی و کشاورزی ایجاد مشکل کند. در مقابل، رودخانه خیرآباد با TDS معادل ۷۳۹ میلی‌گرم در لیتر، تصویر کاملاً متفاوتی ارائه می‌دهد. تمامی پارامترهای شیمیایی در این آب به طور محسوسی پایین‌تر هستند. سدیم (۹۲ در مقابل ۲۹۹)، کلر (۱۴۲ در مقابل ۲۱۷)، و سولفات (۳۸۴ در مقابل ۵۰۰) همگی کاهش چشمگیری نشان می‌دهند که نشان‌دهنده تماس کمتر آب با لایه‌های نمکی و معدنی در حوضه آبریز است. سختی آب نیز اگرچه وجود دارد، اما به میزان قابل توجهی کمتر است. این آب از نظر شیمیایی متعادل‌تر و برای مصارف شرب مناسب‌تر به نظر می‌رسد. نکته جالب توجه در مورد نیترات است که در آب آشامیدنی حاصل از رودخانه خیرآباد (۶/۶ میلی‌گرم در لیتر) کمی بالاتر از مارون (۳/۵۲ میلی‌گرم در لیتر) است. بر اساس استاندارد آب آشامیدنی در ایران (جدول ۲) مقدار مجاز نیترات در آب آشامیدنی ۴/۵ میلی‌گرم در لیتر است که بر اساس این استاندارد، نیترات آب آشامیدنی حاصل از رودخانه خیرآباد کمی بالاتر از استاندارد است که نشان‌دهنده تاثیر فعالیت‌های کشاورزی یا فاضلاب‌های انسانی در حوضه آبریز است [۲۰].

<sup>۱</sup> Total Dissolved Solids

پس از عبور از فیلتراسیون غشایی، مقدار املاح محلول در هیچ کدام از نمونه‌ها تغییر نکرده است. دلیل این رفتار در ذات طراحی و فلسفه وجودی این نوع سیستم نهفته است. فیلتراسیون غشایی یک فرآیند کاملاً فیزیکی است که مانند یک الک فوق العاده ریز عمل می‌کند. غشاهای سرامیکی با حفرات در مقیاس نانومتر تنها قادر به حذف ذرات معلق و میکروارگانسیم‌ها هستند. این ذرات شامل باکتری‌ها، تک یاخته‌ها، گل و لای، و کدورت می‌شوند. اما آنچه در این داده‌ها مشاهده می‌کنیم یون‌های محلول مانند کلسیم، سدیم، کلرید، سولفات و غیره به طور کامل در آب حل شده‌اند و ابعاد آنها در مقیاس آنگستروم (ده‌ها تا صدها بار کوچک‌تر از نانومتر) است. این یون‌های حل شده به سادگی از میان حفرات غشا عبور می‌کنند، درست مانند اینکه نمک طعام از یک صافی بسیار ریز عبور می‌کند [۲۱]. این ویژگی در واقع یک مزیت بزرگ محسوب می‌شود. فرایند میکروفیلتراسیون بدون آنکه در ترکیب شیمیایی آب تغییری ایجاد کند، تنها عوامل بیماری‌زا و ذرات مضر فیزیکی را حذف می‌نماید. این به آن معناست که طعم طبیعی آب حفظ می‌شود و مواد معدنی مفید که برای سلامت انسان ضروری هستند، از آب حذف نمی‌شوند. در واقع، این سیستم هوشمندانه تنها ناخالصی‌های ناخواسته را جدا می‌کند در حالی که ساختار شیمیایی آب را دست نخورده باقی می‌گذارد. این موضوع به وضوح نشان می‌دهد که فرایند میکروفیلتراسیون یک روش تصفیه مکمل است که بر خلاف روش‌هایی مانند اسمز معکوس که تمامی املاح را حذف می‌کنند، رویکردی هدفمند و هوشمندانه دارد [۲۲]. به عبارتی این سیستم می‌داند ذرات معلق و میکروارگانسیم‌ها را باید حذف کرده و املاح معدنی و ترکیبات شیمیایی طبیعی آب را باید حفظ کرد. علاوه بر این، در شکل ۲ درصد هر کدام از یون‌های موجود در نمونه‌ها آورده شده است. این درصد‌ها به ارائه درک بهتری از ویژگی‌های شیمیایی این دو منبع آب کمک می‌کنند. نکته کلیدی که این درصد‌ها ارائه می‌دهند، این است که علیرغم اختلاف زیاد غلظت کلی املاح، سهم نسبی هر یک از یون‌ها در ترکیب شیمیایی کلی هر آب، تا حد قابل توجهی شبیه به هم است. این موضوع نشان‌دهنده یک خویشاوندی زمین‌شناختی در حوضه‌های آبریز این دو رودخانه است، گویی هر دو از انواع مشابهی از سنگ‌ها و خاک‌ها عبور کرده‌اند، اما آب مارون زمان بیشتری برای انحلال این مواد داشته یا از منطقه‌ای با تراکم املاح بیشتر گذر کرده است. برای نمونه، تقریباً در هر دو آب، یون سولفات ( $SO_4$ ) یون غالب است و سهمی حدود ۳۵ تا ۴۲ درصد از کل املاح محلول را به خود اختصاص می‌دهد. این شاهدی قوی بر تأثیرگذاری سازندهای گچی در هر دو حوضه آبریز است. پس از آن، یون سدیم (Na) و یون کلر (Cl) به ترتیب جایگاه بعدی را دارند که حضور همزمان آن‌ها می‌تواند نشان‌دهنده تأثیر سنگ‌ها و خاک‌های حاوی نمک (هالیت) باشد. با این حال، تفاوت‌های ظریفی نیز در سهم نسبی برخی یون‌ها دیده می‌شود که داستان کوچکی را روایت می‌کنند. برای مثال، سهم بی‌کربنات ( $HCO_3$ ) در آب خیرآباد (۱۳/۴ درصد) کمی بیشتر از مارون (۱۲ درصد) است. این می‌تواند نشان‌دهنده تأثیر اندک‌تر اما قابل اندازه‌گیری‌تر سنگ‌های آهکی (کربنات کلسیم) در حوضه رودخانه خیرآباد باشد. از طرف دیگر، سهم کلسیم (Ca) در آب خیرآباد (۱۵/۸ درصد) به وضوح از مارون (۱۲/۴ درصد) بیشتر است، در حالی

که سهم منیزیم (Mg) در مارون (۳/۸ درصد) از خیرآباد (۲/۱ درصد) بیشتر است. این جایگزینی نسبی، بازتاب تفاوت در ترکیب دقیق سنگ‌های دولومیتی (منیزیم‌دار) در مقابل سنگ‌های آهکی (کلسیم‌دار) در مسیر این دو رودخانه است. حتی تفاوت جزئی در نیترات ( $\text{NO}_3$ ) نیز در این داده‌های درصدی خود را نشان می‌دهد. سهم نیترات در آب خیرآباد (۰/۷۲ درصد) به مراتب بیشتر از مارون (۰/۲۵ درصد) است که همانطور که پیش‌تر اشاره شد، می‌تواند نشان‌دهنده تأثیر بیشتر فعالیت‌های کشاورزی یا انسانی در حوضه آبریز خیرآباد باشد.



شکل ۴. خواص فیزیکی شیمیایی نمونه‌های آب تهیه شده قبل و بعد از فیلتراسیون غشایی

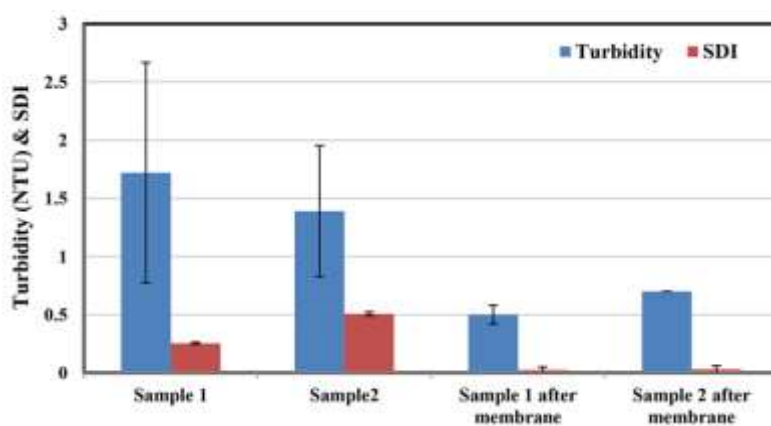
جدول ۲. حداکثر مقدار مجاز املاح موجود در آب آشامیدنی [۲۳]

Fe	Mg	Ca	$\text{NO}_2$	$\text{NO}_3$	$\text{SO}_4$	Cl	F	پارامتر
۰/۳	۱۰۰	۲۰۰	۳ (لحظه‌ای)	۵۰	۵۰۰	۲۵۰	۱/۵	حداکثر مقدار مجاز (mg/L)

### ۳-۳- کدورت و SDI

کدورت مربوط به آب آشامیدنی حاصل از سد مارون، خیرآباد و آب تصفیه شده حاصل از این دو در شکل ۵ آورده شده است. عدد کدورت ۱/۷۲ NTU برای آب خام سد مارون و ۱/۳۹ NTU برای آب خام خیرآباد، نشان دهنده آب‌هایی با کیفیت نسبتاً خوب هستند. اعدادی در این محدوده نشان می‌دهد که تصفیه خانه مربوط به هر دو سد تأثیر مناسبی بر هر دو نمونه آب آشامیدنی از نظر کدورت داشته است. با این حال، این سطح از کدورت نیز برای آب آشامیدنی می‌تواند کمتر شود و از این رو نیاز به تصفیه دارد. مطابق شکل، بعد از انجام فیلتراسیون غشایی بر روی آب آشامیدنی حاصل از رودخانه مارون و خیرآباد کدورت هر دو نمونه به ترتیب به ۰/۵ NTU و ۰/۷ NTU رسیده است. این اعداد نشان دهنده یک افت چشمگیر و بسیار قابل توجه در کدورت است. دلیل این افت کیفی چشمگیر، استفاده از فرایند میکروفیلتراسیون با استفاده از غشاهای سرامیکی با اندازه حفرات نانومتری (حدود ۴۰۰ نانومتر) است. غشاهای سرامیکی به عنوان یک سد فیزیکی مطلق عمل می‌کنند و مانع از عبور بیشتر ذراتی مانند ذرات رس، باکتری‌ها و تک‌یاخته‌ها می‌شوند که قابلیت ایجاد کدورت در آب را دارند [۲].

علاوه بر این، در شکل ۵، SDI برای نمونه‌های مورد نظر آورده شده است. داده‌های شاخص SDI که مکمل داده‌های کدورت هستند، داستان کاملتری از کارایی فوق‌العاده سیستم فیلتراسیون غشایی را روایت می‌کنند و نشان می‌دهند که این فناوری چگونه بر چالش‌های عمیق‌تر تصفیه آب نیز غلبه می‌کند. برخلاف کدورت که فقط ذرات معلق را می‌سنجد، SDI حضور ذرات ریزتر و کلوئیدهایی که تمایل دارند بر روی سطوح فیلترها و غشاهای رسوب کنند و باعث انسداد آنها شوند را نیز کمی‌سازی می‌کند [۱۴]. این موضوع کاملاً حیاتی است که اعداد ۰/۲۵ و ۰/۵ که مربوط به خروجی تصفیه خانه متعارف هر دو رودخانه هستند خود به تنهایی و در مقایسه با استانداردهای جهانی، اعداد بسیار خوب و پایینی برای SDI محسوب می‌شوند. این مقادیر نشان می‌دهند که تصفیه‌خانه‌های اولیه با استفاده از فرآیندهای متعارف مانند انعقاد، لخته‌سازی، ته‌نشینی و فیلتراسیون شنی کار خود را به خوبی انجام داده و آبی تولید کرده‌اند که از نظر پتانسیل گرفتگی، برای بسیاری از مصارف صنعتی و حتی به عنوان پیش تصفیه سیستم‌های اسمز معکوس، کاملاً قابل قبول است. اما اینجا است که فناوری فیلتراسیون غشایی، تعریف جدیدی از کیفیت مطلق را ارائه می‌دهد. اعداد ۰/۰۳ و ۰/۰۲۵ که پس از عبور از غشاهای سرامیکی به دست آمده‌اند، نه تنها یک بهبود ساده، بلکه یک جهش کیفی نمای هستند. کاهش SDI از محدوده بسیار خوب به محدوده فوق‌العاده، به معنای حذف تقریباً کامل آن دسته از ذرات و کلوئیدهای فوق‌العاده ریز و چسبنده‌ای است که حتی سیستم‌های تصفیه پیشرفته متعارف نیز قادر به حذف کارآمد آنها نیستند. به عبارتی سیستم‌های متعارف در نهایت بر اساس جداسازی ذرات بر اساس وزن و اندازه (ته‌نشینی) و فیلتراسیون با منافذ نسبتاً درشت (مثل فیلترهای شنی با شن‌های میلیمتری) کار می‌کنند. آنها در حذف ذرات درشت عالی هستند، اما ذرات کلوئیدی در مقیاس نانومتر می‌توانند از این موانع عبور کنند. این ذرات ریز مانند توپهای میکروسکوپی هستند که به دلیل بار سطحی خود تمایل به چسبیدن به سطوح دارند و همان عامل اصلی گرفتگی در سیستم‌های حساس هستند. غشاهای سرامیکی یک سد فیزیکی مطلق و غیرقابل عبور برای این ذرات ایجاد می‌کنند. می‌توان گفت این فرآیند یک غربالگری فیزیکی در مقیاس نانو است [۱۷].



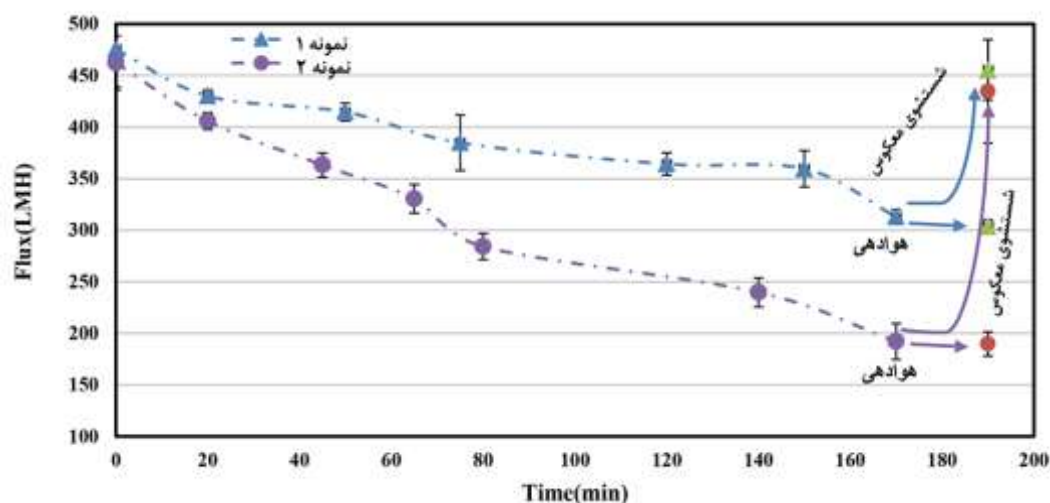
شکل ۵. کدورت و SDI نمونه‌های آب تهیه شده قبل و بعد از فیلتراسیون غشایی

## ۳-۴- عملکرد جداسازی غشایی

شکل ۶ شار عبوری نمونه های تهیه شده از آب آشامیدنی حاصل از دو رودخانه مارون و خیرآباد را با گذشت زمان نشان می دهد. با نگاهی به داده های اولیه شار عبوری برای هر دو رودخانه، یک روند کاملاً مشخص و قابل انتظار را مشاهده می کنیم: کاهش تدریجی عملکرد غشا بر اثر پدیده گرفتگی در اولین دقیقه آزمایش برای آب مارون، شار عبوری در حدود ۴۷۵ LMH است که عدد بسیار مناسبی محسوب می شود. این مقدار برای آب خیرآباد نیز در ابتدا حدود ۴۶۲ LMH است. اما با گذشت زمان، این عدد به طور پیوسته برای هر دو منبع آب کاهش می یابد. نکته جالب در اینجا، مقایسه نرخ کاهش و الگوی گرفتگی بین دو منبع آب است. کاهش شار عبوری در آب رودخانه خیرآباد به مراتب شدیدتر و سریع تر است. این تفاوت فاحش در نرخ گرفتگی، حکایت از تفاوت در ماهیت و ترکیب مواد معلق و کلوئیدی موجود در این دو منبع آب دارد. اگرچه آب خیرآباد از نظر TDS پایین تر است، اما به نظر می رسد حاوی مقادیر بیشتری از مواد آلی طبیعی، جلبک های ریز، یا کلوئیدهای بسیار چسبنده ای است که با شدت بیشتری روی سطح و درون منافذ غشا رسوب می کنند و مسیرهای عبور آب را مسدود می نمایند. این مواد می توانند مانند یک لایه ژله ای و چسبنده عمل کنند که شستشوی آن بسیار دشوار است. در مقابل، مواد معلق در آب مارون ممکن است بیشتر از نوع ذرات معدنی و غیرچسبنده باشند که اگرچه در کوتاه مدت باعث کاهش شار عبوری می شوند، اما پیوند محکمی با سطح غشا برقرار نمی کنند و راحت تر قابل جدا شدن هستند [۲۴].

در این پژوهش به منظور رفع گرفتگی غشایی از دو روش پاک سازی با هوا و شستشوی معکوس استفاده شد. نتایج حاصل از ارزیابی کارایی روش پاک سازی با هوا در بازیابی شار غشایی، از عملکرد نامطلوب این روش حکایت داشت. در این روش، تزریق حباب های هوا از سمت جریان عبور کرده به داخل حفرات غشایی با هدف استفاده از قدرت هوا برای جداسازی لایه رسوب صورت پذیرفت. با این وجود، بر اساس داده های به دست آمده، بازدهی این روش به طور محسوسی ناچیز بود. این عملکرد ضعیف مؤید آن است که نیروی ناشی از حباب های هوا به تنهایی قادر به غلبه بر پیوندهای تشکیل شده بین ماتریس رسوبی و سطح غشا به ویژه در مورد لایه های ژلاتینی و چسبنده ای غالب در نمونه خیرآباد، نمی باشد. این نوع از رسوبات با اتصال محکم به سطح غشا مستلزم اعمال یک نیروی مکانیکی قوی تر و مستقیم تر برای جداسازی هستند. در مقابل، روش شستشوی معکوس با موفقیت چشم گیری همراه بود. در این روش، جریان آب با فشاری بالاتر در خلاف جهت فرایند میکروفیلتراسیون از درون غشا عبور داده شد. این روش با اعمال یک نیروی هیدرولیکی متمرکز و معکوس، منجر به جدایی فیزیکی و حذف رسوبات از سطح و عمق منافذ غشا گردید [۲۵]. از شکل ۶ واضح است که بعد از ۳ ساعت کارکرد شار عبوری غشایی برای نمونه آب مارون و خیرآباد به ترتیب تا ۳۱۳ LMH و ۱۹۲ LMH کاهش یافته که بعد از اعمال شستشوی معکوس به ترتیب تا ۴۵۵ LMH و ۴۳۵ LMH افزایش یافته است. این شار عبوری ها نسبت به مقدار اولیه خود (۴۷۵ LMH و ۴۶۲ LMH) به ترتیب تنها ۴ و ۶ درصد کمتر است که نشان می دهد شار عبوری غشاها از طریق شستشوی معکوس توانسته است برای نمونه آب مارون و

خیرآباد به ترتیب تا ۹۶ و ۹۴ درصد مقدار اولیه خود بازیابی شود که نشان از قابلیت شستشوی معکوس در رفع گرفتگی غشایی دارد. علاوه بر این، رفع گرفتگی با شستشوی معکوس نشان می‌دهد که ماهیت گرفتگی ایجادشده در هر دو نمونه، عمدتاً از نوع قابل بازگشت و مکانیکی بود، به این معنی که رسوبات تشکیل شده پیوند شیمیایی دائمی با سطح غشا ایجاد نکرده بودند [۲۶]. همانطور که در بخش تجربی اشاره شد، مقادیر مقاومت‌های هیدرولیکی و درصد بازیابی شار برای نمونه‌های آب دو رودخانه مارون و خیرآباد محاسبه شده و نتایج آن در جدول ۳ آورده شده است. مقادیر به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که در هر دو نمونه آب، مکانیسم غالب گرفتگی از نوع برگشت‌پذیر بوده است. به عبارت دیگر، بخش عمده کاهش شار عبوری (بیش از ۹۱ درصد در نمونه مارون و بیش از ۹۳ درصد در نمونه خیرآباد) ناشی از تشکیل لایه کیک و رسوب ذرات بر روی سطح غشا است که با شستشوی معکوس به راحتی قابل حذف می‌باشد. این یافته با بازیابی چشمگیر شار عبوری پس از شستشوی معکوس (۹۶ درصد برای نمونه مارون و ۹۴ درصد برای نمونه خیرآباد) کاملاً همخوانی دارد. از سوی دیگر، سهم گرفتگی برگشت‌ناپذیر که ناشی از نفوذ ذرات ریز به درون منافذ غشا، جذب سطحی مواد آلی و تشکیل پیوندهای پایدار با دیواره حفرات می‌باشد، در هر دو نمونه بسیار ناچیز بوده است. این موضوع نشان‌دهنده مقاومت بالای غشای سرامیکی سنتز شده در برابر گرفتگی عمقی و همچنین کیفیت مطلوب آب خوراک پس از مراحل پیش‌تصفیه در تصفیه‌خانه است که حاوی مقادیر کمی از ذرات بسیار ریز و مواد آلی چسبنده می‌باشد. نکته قابل توجه، اختلاف در میزان مقاومت برگشت‌پذیر بین دو نمونه است. مقاومت برگشت‌پذیر در نمونه آب خیرآباد به مراتب بیشتر از نمونه آب مارون می‌باشد. این اختلاف موید آن است که آب رودخانه خیرآباد با وجود TDS پایین‌تر، حاوی مقادیر بیشتری از مواد آلی طبیعی، کلوئیدهای چسبنده یا ذرات ریزتر است که تمایل بیشتری به تجمع بر سطح غشا و تشکیل لایه کیک متراکم‌تر دارند. این مشاهدات اهمیت آنالیز دقیق ماهیت آلاینده‌ها را فراتر از پارامترهای کلی مانند TDS آشکار می‌سازد.



شکل ۶. عملکرد جداسازی غشای سرامیکی به منظور تصفیه آب آشامیدنی حاصل از دو رودخانه مارون و خیرآباد با گذشت زمان

جدول ۳. مقادیر مقاومت‌های هیدرولیکی و درصد بازیابی شار برای نمونه‌های دو رودخانه مارون و خیرآباد

پارامتر	نمونه ۱	نمونه ۲
شار اولیه	Lmh۴۷۵	Lmh۴۶۲
شار نهایی قبل از شستشو	Lmh۳۱۳	Lmh۱۹۲
شار پس از شستشوی معکوس	Lmh۴۵۵	Lmh۴۳۵
مقاومت ذاتی غشا	$m^{-1} \times 3/79$	$m^{-1} \times 3/79$
مقاومت کل قبل از شستشو	$m^{-1} \times 5/75$	$m^{-1} \times 9/37$
مقاومت کل پس از شستشو	$m^{-1} \times 3/96$	$m^{-1} \times 4/14$
مقاومت برگشت‌پذیر	$m^{-1} \times 1/79$	$m^{-1} \times 5/23$
مقاومت برگشت‌ناپذیر	$m^{-1} \times 0/17$	$m^{-1} \times 0/35$
سهم گرفتگی برگشت‌پذیر	۹۱/۳ درصد	۹۳/۷ درصد

### ۳-۵- خواص میکروبیولوژی

جدول ۴ نتایج حاصل از تست بار میکروبی نمونه های آب آشامیدنی دو رودخانه مارون و خیر آباد، نمونه های کلر زنی شده و نیز نمونه های عبور کرده از فیلتراسیون غشایی را نشان می‌دهد. نخست باید به این نکته توجه کرد که اعداد گزارش شده در آب هر دو رودخانه، به وضوح نشان‌دهنده آلودگی شدید میکروبی است. حضور باکتری‌های گروه کلیفرم مانند یک نشانگر خطر عمل می‌کند. این باکتری‌ها به خودی خود ممکن است همگی بیماری‌زا نباشند، اما حضور آن‌ها حکایت از آن دارد که آب در معرض مدفوع حیوانات یا انسان قرار گرفته است و بنابراین، به طور قطع حاوی پاتوژن‌ها (عوامل بیماری‌زای) خطرناکی مانند باکتری اشرشیا کلی است. وجود ۴۰ و ۶۰ عدد اشرشیا کلی در ۱۰۰ میلی‌لیتر آب، این خطر را تأیید می‌کند و مصرف چنین آبی بدون تصفیه می‌تواند به سرعت منجر به شیوع بیماری‌های گوارشی جدی مانند اسهال خونی، حصبه و وبا شود [۲۷].

نتایج نشان می‌دهد استفاده از یکی از دو روش کلر زنی و میکروفیلتراسیون منجر به دستیابی به نتیجه یکسان یعنی آب کاملاً پاک از نظر میکروبی می‌شوند، اگرچه مسیر رسیدن به این هدف در این روش‌ها به طور بنیادی متفاوت است. کلر زنی یک روش شیمیایی برای ضدعفونی کردن آب است. در این روش، با افزودن کلر به آب، یک حمله شیمیایی همه‌جانبه به دنیای میکروبی آب آغاز می‌شود. کلر با نفوذ به دیواره سلولی میکروارگانیسم‌ها، آنزیم‌ها و مکانیسم‌های سوخت و ساز آن‌ها را غیرفعال می‌کند و در نهایت منجر به مرگ آن‌ها می‌شود. این روش بسیار مؤثر و قدرتمند است و یک سایه محافظ در طول شبکه توزیع آب ایجاد می‌کند که از آلودگی‌های ثانویه نیز جلوگیری می‌نماید. با این حال، نقطه ضعف آن، امکان تشکیل فرآورده‌های جانبی ضدعفونی است. هنگامی که کلر با مواد آلی طبیعی موجود در آب واکنش دهد، می‌تواند موادی مانند تری هالومتان‌ها را تولید کند که در درازمدت و با مصرف مقادیر زیاد، ممکن است با خطرات سلامت مرتبط باشند. همچنین، برخی از انگل‌های مقاوم ممکن است در برابر دوزهای متعارف کلر تا حدی مقاومت کنند. در مقابل، فیلتراسیون غشایی یک روش فیزیکی کاملاً متفاوت را در پیش می‌گیرد. این سیستم مانند یک دیوار دفاعی غیرقابل نفوذ عمل می‌کند که هیچ میکروارگانیسمی اجازه عبور از آن

را ندارد. غشاهای سرامیکی با حفرات نانومتری، یک سد فیزیکی مطلق در برابر باکتری‌ها ایجاد می‌کنند. این فرآیند می‌تواند حتی ویروس‌ها را که کوچک‌تر هستند نیز به دام اندازد، زیرا ویروس‌ها عموماً به ذرات بزرگ‌تر چسبیده یا در کنگلومراهایی قرار می‌گیرند که نمی‌توانند از منافذ غشا عبور کنند. بزرگ‌ترین مزیت این روش، حذف فیزیکی و بدون تماس میکروارگانسیم‌هاست، به این معنی که هیچ ماده شیمیایی به آب افزوده نمی‌شود و در نتیجه هیچ فرآورده جانبی مضر نیز تشکیل نمی‌گردد. طعم و بوی طبیعی آب نیز دست‌نخورده باقی می‌ماند [۲۸].

از نتایج مربوط به نمونه‌های خروجی از غشا می‌توان گفت که فیلتراسیون غشایی در حذف بخش اعظمی از بار میکروبی موفق عمل کرده است. با توجه به این نتایج در صورتی که این دو روش به صورت مکمل استفاده شوند، فیلتراسیون غشایی بخش عمده آلودگی را حذف کرده و سپس از یک ضدعفونی‌کننده سبک تنها برای ایجاد اثر محافظتی در شبکه توزیع استفاده می‌شود. این همکاری، امن‌ترین و مطمئن‌ترین راه برای رساندن آبی پاک و سالم به انتهای خط مصرف بوده و از تشکیل محصولات جانبی کلر زنی به دلیل غلظت زیاد کلر جلوگیری می‌کند [۲۹].

جدول ۴. خواص میکروبیولوژی نمونه های آب تهیه شده قبل و بعد از میکروفیلتراسیون و مقایسه آن با روش کلر زنی

نمونه	شمارش احتمالی کلیفرم (MPN/100)	شمارش تأییدی کلیفرم (MPN/100)	اشرشیاکلی (MPN/100)
نمونه ۱	۱۲۰	۵۰	۵۰
نمونه ۲	۱۰۰	۷۰	۷۰
نمونه ۱ بعد از کلرزنی	<۱/۱	<۱/۱	<۱/۱
نمونه ۲ بعد از کلرزنی	<۱/۱	<۱/۱	<۱/۱
نمونه ۱ بعد از میکروفیلتراسیون	۲۶	۱۷	۱۷
نمونه ۲ بعد از میکروفیلتراسیون	۲۲	۱۵	۱۵

### ۳-۶- نتیجه‌گیری

این مطالعه علاوه بر مقایسه کیفیت آب آشامیدنی حاصل از دو رودخانه مارون و خیرآباد، به‌وضوح کارایی فناوری فیلتراسیون غشایی با استفاده از غشاهای سرامیکی نانومتری را در تصفیه آب‌های سطحی با ویژگی‌های کیفی متفاوت نشان می‌دهد. مقایسه دو منبع آب مورد مطالعه حاکی از تفاوت‌های چشمگیر در ویژگی‌های شیمیایی اولیه بود؛ به‌طوری که آب رودخانه مارون از نظر شیمیایی غنی‌تر و سنگین‌تر از آب رودخانه خیرآباد بود. این تفاوت‌ها نشان‌دهنده تأثیرپذیری کیفیت آب از سازندهای زمین‌شناسی خاص هر حوضه آبریز است. علیرغم این تفاوت‌های اولیه، فرایند میکروفیلتراسیون در هر دو مورد عملکرد یکسان و بسیار مطلوبی از خود نشان داد. این سیستم نه‌تنها قادر به حذف کامل آلاینده‌های فیزیکی و میکروبیولوژیکی شامل ذرات معلق، کدورت، باکتری‌های شاخص آلودگی بود، بلکه به‌طور همزمان ترکیب شیمیایی و تعادل یونی طبیعی آب را نیز بدون تغییر حفظ کرد. این ویژگی منحصربه‌فرد، فیلتراسیون غشایی را به عنوان یک روش تصفیه مکمل هدفمند متمایز می‌سازد. از

نقطه نظر عملکرد غشا، آب خیرآباد با وجود TDS پایین تر، به دلیل احتمال حضور مواد آلی طبیعی و کلونیدهای چسبنده، نرخ گرفتگی بیشتری نشان داد. علاوه بر این، برای نمونه مارون و خیرآباد شستشوی معکوس قادر به بازیابی شار عبوری غشا و ارتقای آن به ترتیب تا ۹۶ و ۹۴ درصد از مقدار شار اولیه بود. نتایج حاصل از تحلیل مقاومت‌های هیدرولیکی نشان داد که غشای سرامیکی سنتز شده از قابلیت شستشوی پذیری مطلوب برخوردار بوده و گرفتگی ایجاد شده عمدتاً از نوع سطحی و قابل بازگشت است. این ویژگی از منظر عملیاتی حائز اهمیت فراوان است، زیرا امکان بهره‌برداری بلندمدت با دوره‌های شستشوی متناوب را بدون نیاز به تعویض مکرر غشا فراهم می‌آورد و هزینه‌های عملیاتی را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد. این موضوع برتری قطعی این روش نسبت به پاک‌سازی با هوا و همچنین ماهیت عمدتاً مکانیکی و قابل بازگشت گرفتگی را تأیید می‌نماید. نتایج حاصل از بار میکروبی نشان داد در مقایسه با روش متعارف کلر زنی، فرایند میکروفیلتراسیون غشایی در حذف بخش اعظمی از بار میکروبی موفق عمل کرده و در صورت استفاده از این روش به عنوان مرحله مکمل کلر زنی، این روش بخش عمده آلودگی را حذف کرده و سپس از یک ضد عفونی کننده سبک تنها برای ایجاد اثر محافظتی در شبکه توزیع استفاده می‌شود. این همکاری، امن‌ترین و مطمئن‌ترین راه برای رساندن آبی پاک و سالم به انتهای خط مصرف بوده و از تشکیل محصولات جانبی کلر زنی به دلیل غلظت زیاد کلر جلوگیری می‌کند.

#### ۴- تقدیر و تشکر

بدینوسیله از تمامی حمایت‌های دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان و تصفیه خانه بزرگ بهبهان تشکر و قدردانی می‌گردد.

#### ۵- فهرست منابع و مآخذ

- [1] Yarimoghadam, N., Lorestani, B., cheraghi, mehrdad, & Jamehbozorgi, S. (2021). Evaluation Of The Modified Almond Shell And Carboxymethyl cellulose Performance With Graphene Oxide In Removal Of Heavy Metals Ni And Cd From Water. *Applied Chemistry Today*, 16(58), 107–124. (in persian). <https://doi.org/10.22075/chem.2020.19393.1775>.
- [2] Quintana, K.T., & Sowby, R.B. (2025). Minimal effect of raw water turbidity on operational energy use of drinking water treatment. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 12, 101132.
- [3] Kojabad, M.E., & Aghdami, A. (2025). Investigating the effect of coagulation and ozonation on enhancing the efficacy of membrane filtration for papermaking effluent treatment. *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*, 16(1), 109-123. (In Persian).
- [4] Cabral, A.L.R., Barroca, L.R., Pedrosa, M., Ribeiro, A.R.L., & Silva, A.M.T. (2025). Drinking water treatment: Removal of pharmaceuticals using a Spirulina-based carbon biosorbent. *Journal of Water Process Engineering*, 75, 103930.
- [5] Huang, X., Ao, Y., Yang, H., Feng, M., Wang, X., Chen, R., & Lu, J. (2025). A novel approach to healthy water Treatment: Boiling-Based UV photoelectrochemical oxidation process for the removal of disinfection by-products from drinking water. *Chemical Engineering Journal*, 515, 163658.

- [6] Tupe, J.V., Khot, S.M., Padmanabhan, D., & Rajaguru, B. (2025). Polysulfone membranes with natural additives for water purification: Fabrication and performance testing. *Polymer*, 338, 129070.
- [7] Shen, Y., Chen, Z., Shen, J., Wang, B., Yan, P., Kang, J., ... & Chen, R. (2025). A pilot-scale study of in situ granular activated carbon regeneration via ozone micro-nano bubbles oxidation for long-lasting micropollutant purification in water. *Chemical Engineering Journal*, 523, 168434.
- [8] Kojabad, M.E., & Aghdami, A. (2025). The treatment of papermaking effluent with the hybrid process of coagulation-ozonation-membrane filtration in order to recycle and reuse. *Iranian Journal of Health and Environment*, 18(2), 335-348. (In Persian).
- [9] Fu, W., Tang, T., Chen, X., Yang, Y., Mi, B., Yang, K., ... & Zhang, X. (2023). Nano-ceramic membranes combined with ozonation for water treatment: Fundamentals and engineering applications. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 10, 100279.
- [10] Tomczak, W., & Gryta, M. (2021). Application of ultrafiltration ceramic membrane for separation of oily wastewater generated by maritime transportation. *Separation and Purification Technology*, 261, 118259.
- [11] Zou, J., Li, Y., Tang, T., Deng, Y., Yang, K., Yang, Y., ... & Zhang, X. (2025). Molecular insights into the enhanced water purification of algal-rich water by in-situ ozonation/manganese-doped ceramic membrane process. *Separation and Purification Technology*, 377, 132456.
- [12] Chen, X., Ma, J., Chen, J., & Wang, Z. (2023). Ceramic membrane filtration coupled with ozonation for water purification: Principles, applications and perspectives. *Journal of Water Process Engineering*, 55, 104256.
- [13] Aghdami, A., & Elyasi Kojabad, M. (2024). Wastewater Treatment Hybrid Process Using Coagulation-Membrane Filtration for Industrial Purposes. *Applied Chemistry Today*, 19(72), 269–282. [https://chemistry.semnan.ac.ir/article\\_8987.html](https://chemistry.semnan.ac.ir/article_8987.html)
- [14] Estabar, H., & Shafeeyan, M.S. (2024). Performance Evaluation of Ceramic Membranes in the Pre-treatment of Reverse Osmosis for the Removal of Suspended Solids and Organic Matter from Well Water. *Journal of Water and Wastewater Science and Engineering*, 9(4), 37–56. [https://www.jwwse.ir/article\\_207407.html](https://www.jwwse.ir/article_207407.html)
- [15] Li, S., Zhu, T., Ji, W., Wu, Z., Ren, T., Zhang, S., ... & Zhang, Y. (2024). Catalytic ceramic membranes with ozonation for wastewater treatment: Preparations, mechanisms and applications. *Chemical Engineering Journal*, 501, 156900.
- [16] Behboudi, A., Jafarzadeh, Y., & Yegani, R. (2017). Polyvinyl chloride/polycarbonate blend ultrafiltration membranes for water treatment. *Journal of Membrane Science*, 534, 18–24. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2017.04.011>
- [17] YYe, H., Yan, Z., Lou, L., Sun, J., Zhong, J., Zhang, L., ... & Zhang, L. (2026). Fouling in beer clarification using polyethersulfone hollow fiber membranes. *Journal of Membrane Science*, 406, 123456.

- [18] Ajiboye, T.O., Sawunyama, L., Ravele, M.P., Rasheed-adeleke, A.A., Seheri, N.H., Onwudiwe, D.C., ... & Makhatha, M.E. (2023). Synthesis approaches to ceramic membranes, their composites, and application in the removal of tetracycline from water. *Environmental Advances*, 12, 100371. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2023.100371>
- [19] Kojabad, M.E., Amirabedi, P., & Dorfeshan, M. (2024). Enhanced CO<sub>2</sub> Separation Using Pebax Membrane Modified with Ethylene Glycol Monophenyl Ether. *Journal of Gas Technology*, 9(2), 28–38. [https://www.jgt.irangi.org/article\\_721338.html](https://www.jgt.irangi.org/article_721338.html)
- [20] APHA. (1926). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (Vol. 6). American Public Health Association.
- [21] He, H., Wang, X., Huang, X., Wang, X., Zhu, H., Chen, F., ... & Wen, X. (2025). Leveraging almost hydrophobic PVDF membrane and in-situ ozonation in O<sub>3</sub>/UF/BAC system for superior anti-fouling and rejection performance in drinking water treatment. *Water Research*, 274, 123105.
- [22] Pepper, D. (1978). *Reverse Osmosis and Ultrafiltration*. Institution of Chemical Engineers Symposium Series, 247–252.
- [23] World Health Organization. (Ed.). (2017). *Guidelines for drinking-water quality* (4th ed.). World Health Organization.
- [24] Niebla, V., Rivera, C., Cruz, Y., Rodríguez-González, F.E., Rodríguez, A., Velázquez Tundidor, M.V., ... & Tundidor-Camba, A. (2025). Improved fouling resistance in polysulfone-based ultrafiltration membranes by the addition of polar peptoid oligomers obtained from Ugi-4CR. *Synthesis and characterization*. *Polymer*, 320, 129070.
- [25] Song, D., Han, X., Li, J., Cheng, W., Liu, C., Wu, C., ... & Zhang, Y. (2024). Migration of membrane fouling with minimal damage to cell integrity by catalytic ceramic membrane systems in low dosages of ozone during algae-laden water treatment. *Chemical Engineering Journal*, 500, 156789.
- [26] Wei, D., Tao, Y., Zhang, Z., Liu, L., & Zhang, X. (2016). Effect of in-situ ozonation on ceramic UF membrane fouling mitigation in algal-rich water treatment. *Journal of Membrane Science*, 498, 116–124.
- [27] Rasool, T., Ishtiaq Ali, M., Jamal, A., Huang, Z., & Urynowicz, M. (2023). Performance evaluation and microbial profiling of integrated vertical flow constructed wetland (IVFCW) for simultaneous treatment of domestic and pulp and paper industry waste water. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 30(12), 103890.
- [28] Salih, A.A.M., Yi, C., Peng, H., Yang, B., Yin, L., & Wang, W. (2014). Interfacially polymerized polyetheramine thin film composite membranes with PDMS inter-layer for CO<sub>2</sub> separation. *Journal of Membrane Science*, 472, 110–118. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2014.08.019>
- [29] Wei, Y., Lu, J., Xu, Y., Song, X., Yu, Y., Zhang, H., ... & Huang, Y. (2023). Nanozyme-immobilized cellulose membranes designed by a simple hydrogen bond-dominated for colorimetric detection of hydrogen peroxide and uric acid. *Microchemical Journal*, 193 (206), 109206.